

# 短基线 DInSAR 法长江漫滩区大面积沉降监测研究

黄其欢<sup>1,2,3</sup>, 徐佳<sup>1</sup>

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国矿业大学 国土环境与灾害监测国家测绘局  
重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 河海大学 文天学院, 安徽 马鞍山 243031)

**摘要:** 南京河西地区属近代长江退移形成的河漫滩地, 固结沉降一直持续发展。提出利用短基线 DInSAR 新方法监测长江漫滩区大面积地表沉降的新思路, 利用多幅差分干涉图序列进行时间序列分析, 获取大面积地表沉降的演变过程。南京河西长江漫滩区 1996 年到 2000 年短基线 DInSAR 法沉降监测试验结果表明, 该区大部分存在不同程度地面沉降, 最大累积沉降量达 12 cm。与精密水准检测结果在空间分布上的一致性证明了该方法的正确性。

**关键词:** 沉降监测; DInSAR; 短基线; 漫滩

中图分类号: P642.26; P225.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2011)01-0007-04

## Monitoring Study of Large Scale Subsidence in Flood Land Areas along Yangtze River Based on Short Baseline DInSAR Method

HUANG Qihuan<sup>1,2,3</sup>, XU Jia<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;  
2. Key Lab for Land Environment and Disaster Monitoring of SBSM, China University of Mining and Technology,  
Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3. Wentian College, Hohai University, Ma'anshan, Anhui 243031, China)

**Abstract:** The west area of Nanjing Qinhuai River belong to flood land formed by retrogressive evolution of Yangtze River in modern times and its consolidation settlement has been continuously developing. In this paper, a new subsidence monitoring method of short baseline DInSAR, which used a number of differential interferograms to generate displacement time series, was proposed; the strong point of the new method is that it can get the surface subsidence evolution process in a large area of land. The settlement monitoring results in the flood lands of the Yangtze River from August 1996 to April 2000 showed that the surface subsidence happened in most parts of the study area, and the largest came to 12 cm. The consistency of the spatial distribution of monitoring results with precise leveling proved the validity of this method.

**Key words:** subsidence monitoring; DInSAR; short baseline; flood land

南京河西为秦淮新河以北、秦淮河和凤台南路以西、长江以东的地区, 计 55.7 km<sup>2</sup>。按照南京总体规划的滨江城市发展战略<sup>[1]</sup>, 将在河西地区及沿长江一带兴建更多的高层建筑, 特别是全国第十届运动会主会场落户南京河西, 一个现代化新南京的代表区域正在南京西部崛起。然而, 河西地区属于近代长江退移形成的河漫滩地, 地形低凹、平坦, 软土层相对稳定, 固结沉降尚未完成, 一直持续发展<sup>[2]</sup>。近年来, 随着大规模工程建设, 地面承受的荷载不断增加, 地下水位变化明显, 建筑物不均匀沉降、路面开裂等现象时有发生。

目前传统的精密水准、GPS 测量技术已经用于河西地区地面沉降监测, 但是传统监测方法成本高, 且获

收稿日期: 2010-09-02

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2009B11214); 国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室开放基金项目(LED2009C09); 高等学校优秀青年人才基金项目(2011SQRL170)。

作者简介: 黄其欢(1978—), 男, 安徽舒城人, 讲师, 博士, 主要从事合成孔径雷达干涉理论方面的研究。

E-mail: InSAR@hhu.edu.cn.

取的仅仅是点目标的沉降结果。合成孔径雷达差分干涉测量技术(differential synthetic aperture radar interferometry, DInSAR)作为一项对地观测新技术,可以获取厘米甚至毫米精度的大范围(100 km×100 km)地表形变<sup>[3]</sup>,有效克服了地面沉降监测中人工布设观测点信息量不足的瓶颈问题,可以用于监测地震形变<sup>[4-6]</sup>、火山运动<sup>[7]</sup>、地面沉降<sup>[8]</sup>及山体滑坡<sup>[9]</sup>等。然而,常规 DInSAR 法难以克服 SAR 影像的时间、空间失相干和大气不一致性的影响,特别是长时间缓慢形变监测的时间失相干问题。另外,常规 DInSAR 法只能获取较短时间内的地表形变总量,难以获取形变的演变过程,如了解地震周期变化规律、地下水回灌控制地面沉降周期等。为此,2002 年, Berardino 等<sup>[10]</sup>提出短基线 DInSAR 形变监测方法,该方法将研究区多幅影像分成多个具有较短空间基线的影像组,利用组内的影像对生成差分干涉图,提高了干涉影像的相干性,且可提取地面沉降的演变过程,并保留了传统 DInSAR 法大面积覆盖和高空间分辨率的优点。本文将高精度、低成本、大面积覆盖的 DInSAR 技术用于沿江漫滩区的地面沉降监测,为城市的规划发展和地质灾害预防提供参考数据。

## 1 地层结构及工程特性

河西地区为长江漫滩,地势平坦、低洼,地面平均高程在 7.0 m(吴淞高程系)左右。软土层厚约 50 m,表层为填土和硬壳层,厚度一般为 2~3 m,表层下大致可分为:上部②-2 淤泥质粉质粘土,层厚 14~35 m;中部②-3 淤泥粉质粘土与粉土互层,埋深 8~35 m,层厚 0~33 m;下部为②-4 粉土粉细砂层。土层平面分布极不均匀,一些部位缺失②-3 层,一些部位缺失②-4 层。其物理力学特性为含水量大、孔隙比大、高压缩性、高灵敏度、低强度与透水性差等。根据大量的调查,总结出河西软土的工程特性有以下几点<sup>[11]</sup>:

- 1)承载力低、变形大:河西地区软土的地基承载力标准值,各层一般都在 60~100 kPa 之间,对于荷载较大的多层砖混结构的住宅楼,必须采用人工加固地基,如通常在河西地区采用的深层搅拌桩复合地基。
- 2)软土地基变形延续时间长:软土的透水性很差,排水固结非常缓慢,使地基变形延续时间很长。另外,漫滩相软土具有夹砂结构特征,土质均匀性差,又容易引起地基不均匀变形。

## 2 短基线 DInSAR 沉降监测方法

设有按时间序列  $t_0, \dots, t_N$  获取的  $N+1$  幅已配准单视复数 SAR 影像。首先,设定垂直基线阈值(小于 300 m),将垂直基线小于该阈值的影像归在同一组,所有影像共分为  $L$  组;然后,对每组内的影像进行差分干涉处理,  $L$  组影像共可得到  $M$  幅差分干涉图;最后,以  $t_0$  为参考时刻,任意时刻  $t_i (i = 1, \dots, N)$  相对于参考时刻的差分相位  $\phi(t_i)$  为未知数,差分干涉处理获取的干涉相位  $\delta\phi(t_k) (i = 1, \dots, M)$  为观测量,在不考虑大气延迟和数字高程模型(digital elevation model, DEM)误差的影响情况下,对第  $k$  幅( $k = 1, \dots, M$ )差分干涉相位图中的任意像元  $(x, r)$ ,  $\delta\phi_k(x, r)$  可表达为

$$\delta\phi_k(x, r) = \phi(t_i, x, r) - \phi(t_j, x, r) \approx \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_i, x, r) - d(t_j, x, r)] \quad (1)$$

式中: $\lambda$  为雷达波长; $d(t_i, x, r)$  和  $d(t_j, x, r)$  分别为  $t_i$  和  $t_j$  时刻像元  $(x, r)$  相对于参考时刻  $t_0$  的 LOS(line of sight) 向地表形变量。

将式(1)中的  $\phi(t_i, x, r)$  变为相邻影像像元沿 LOS 方向的平均相位变化速率  $v_i$ , 有

$$\mathbf{v}^T = [v_1 = \frac{\phi_1 - \phi_0}{t_1 - t_0}, \dots, v_N = \frac{\phi_N - \phi_{N-1}}{t_N - t_{N-1}}] \quad (2)$$

将式(2)带入式(1)得

$$\sum_{k=IS_j+1}^{IE_j} (t_k - t_{k-1}) v_k = \delta\phi_j \quad (3)$$

即:

$$\mathbf{B}\mathbf{v} = \delta\boldsymbol{\phi} \quad (4)$$

式(3)中,  $\mathbf{IE}$  和  $\mathbf{IS}$  分别为按时间顺序排列的主、从影像序列,满足  $IE_j > IS_j, \forall j = 1, \dots, M$ ;式(4)中  $\mathbf{B}$  是  $M \times N$  矩阵。

当所有的影像被分在一组时,式(4)可以用最小二乘法求解;否则,需对  $B$  进行奇异值分解,求得相位平均变化速率  $v$  的最小范数最小二乘解,从而获取每个像元地表形变的演变过程。短基线 DInSAR 法提取地表形变的数据流程如图 1 所示。

### 3 南京长江漫滩区沉降反演试验

选择南京地区 8 幅 ERS2 SAR 影像进行短基线 DInSAR 法沉降监测试验,影像时间为 1996-08-19—2000-04-10。按照垂直基线阈值 100 m 将所有影像对分成两个组,每个组内的影像进行两两差分干涉,共组成 13 幅差分干涉影像对,如表 1 所示,其中垂直基线最长约 98 m,最短约 22 m。

图 2 为南京地区 SAR 幅度影像,其中白色矩形区为河西漫滩沉降监测试验区。图 3 为利用短基线 DInSAR 法获取的研究区域地表沉降伪彩色图与 Google Earth 影像的叠加效果。图 4 给出了图 3 中 A、B 两地面点从 1996 年 8 月到 2000 年 4 月的地面沉降时间序列。

从图 3 和图 4 可以看出:1)短基线 DInSAR 法的监测点密度高,反映地表沉降的相干像元的空间分布覆盖了整个实验区域,如密集建筑物群体、道路等,而对一些易变化的反射体,如水体等,则相干目标较少;2)研究区域出现了不同程度的地面沉降,其中影像北部的秦淮河长江入口处以及南部的秦淮新河沿线沉降量较大,最大累积沉降量达 12 cm;3)沉降的速率不均匀,且呈现增大趋势。

从点 A 和点 B 的地表沉降时间序列可知,1999 年以前的地表沉降速率都较小,在 1998 年 12 月 7 日甚至表现出微量的上升,而 1999 年以后沉降速率迅速增大。这种现象是否与长江水位的变化特别是 1998 年夏季的长江特大洪水导致地下水水位升高有关,还需要进一步验证。

图 5 为 2006 年 9 月到 2007 年 1 月研究区域精密水准测量结果,可以看出,虽然短基线 DInSAR 法与水准监测结果在时间尺度上相差 6 年多,但在地面沉降的空间分布上较为一致。

### 4 结论

相对于仅能获取单点沉降信息的精密水准、GPS 技术,基线 DInSAR 法可以全天时、全天候、低

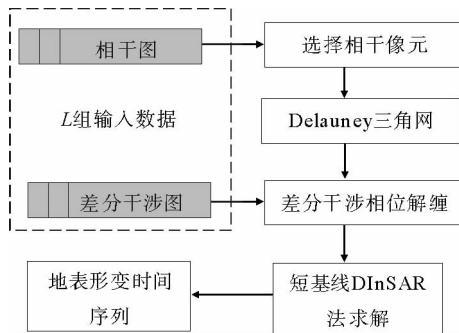


图 1 短基线 DInSAR 法数据处理流程图

Fig. 1 The flowchart of data processing of short baseline DInSAR

表 1 ERS2 SAR 影像差分干涉对表

Tab. 1 The difference Interferograms generated by ERS2 SAR image pairs

编号	主影像日期	从影像日期	$B^\perp$ / m	$B^\parallel$ / m	时间基线 / d	组号
1	1999-10-18	1999-07-05	-98.2	39.9	105	1
2	1999-10-18	1999-04-26	-77.4	42.4	175	1
3	1999-10-18	1998-12-07	-48.8	23.1	315	1
4	1999-10-18	1996-08-19	-86.9	-3.0	1 158	1
5	1999-07-05	1999-04-26	34.9	2.6	70	1
6	1999-07-05	1998-12-07	86.2	-16.8	210	1
7	1999-07-05	1996-08-19	21.9	-43.0	1 050	1
8	1999-04-26	1998-12-07	53.2	-19.3	140	1
9	1999-04-26	1996-08-19	43.7	-45.6	980	1
10	1998-12-07	1996-08-19	-86.5	-26.1	840	1
11	2000-04-10	1997-12-22	-66.5	-118.9	840	2
12	2000-04-10	1997-11-17	-73.2	-80.3	875	2
13	1997-12-22	1997-11-17	-67.5	38.2	35	2

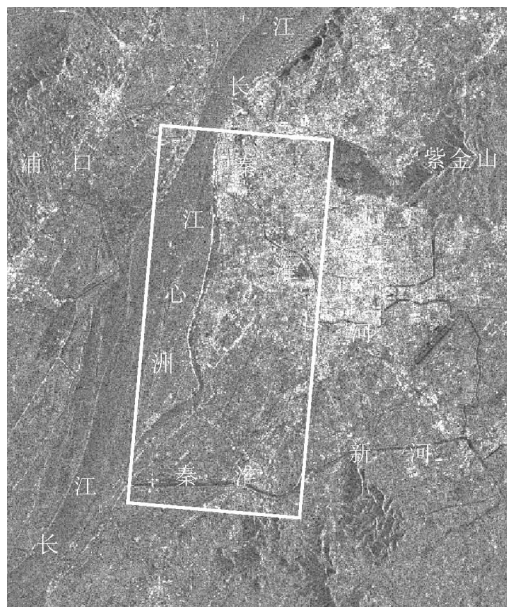


图 2 SAR 幅度影像及研究区域图

Fig. 2 The SAR amplitude image and the study area

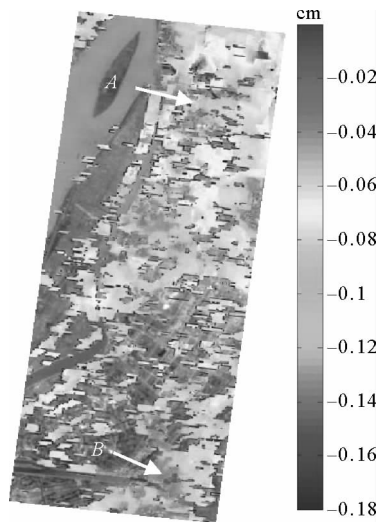


图3 雷达视线向累积沉降伪彩色图

Fig. 3 The false-color map of cumulative subsidence from radar sight

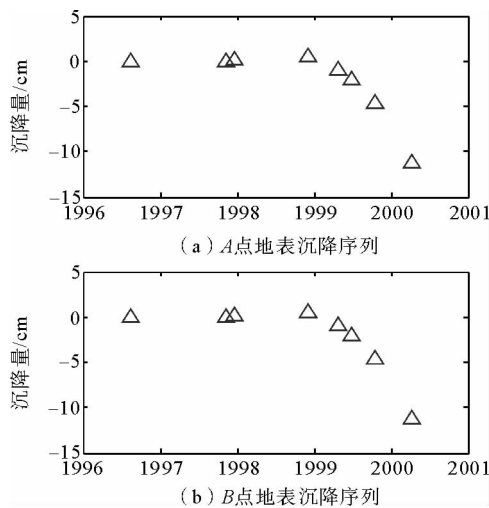


图4 图3中A、B点地表沉降时间序列图

Fig. 4 The diagram of subsidence time series of the marked points A and B in Fig. 3

成本地获取大面积、高空间分辨率、连续地表沉降信息。南京河西长江漫滩区短基线DInSAR法沉降监测结果表明:1)南京河西长江漫滩区存在不同程度地面沉降,沉降的速率不均匀,且呈现增大趋势,1996年到2000年的最大累积沉降量达12 cm;2)在基线小于100 m的情况下,短基线DInSAR方法获取的长江漫滩区地表沉降信息与精密水准检测结果在空间分布上一致性较好,证明它是一种有效的沉降监测方法。

**致谢:**在本文试验中,欧洲空间局(ESA)提供了相关SAR影像数据,荷兰Delft大学提供了Doris软件,谨致谢意。

**参考文献:**

[1]徐巍,杨群,古国才,等.南京河西新城区房地产发展趋势分析[J].现代城市研究,2002(6):57-60.  
XU Wei, YANG Qun, GU Guocai, et al. Analysis of real estate development of Hexi new city zone in Nanjing[J]. Modern Urban Research, 2002(6):57-60.

[2]黄广龙,卫敏,韩爱民,等.南京长江漫滩地层中地铁结构的沉降分析[J].水文地质工程地质,2006(3):112-116.  
HUANG Guanglong, WEI Min, HAN Aimin, et al. Analysis on the subsidence of tunnel foundation in Nanjing Yangtze River valley flat [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006(3):112-116.

[3]GABRIEL K, GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94:9183-9191.

[4]MASSONNET D, ROSSI M, CARMONA C. et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry[J]. Nature, 1993, 364:138-142.

[5]FIALKO Y, SANDWELL D, SIMONS M, et al. Three dimensional deformation caused by the Bam, Iran, earthquake and the origin of shallow slip deficit[J]. Nature, 2005, 435:295-299.

[6]王超,刘智,张红,等.张北-尚义地震同震形变场雷达差分干涉测量[J].科学通报,2000,45(23):2550-2554.

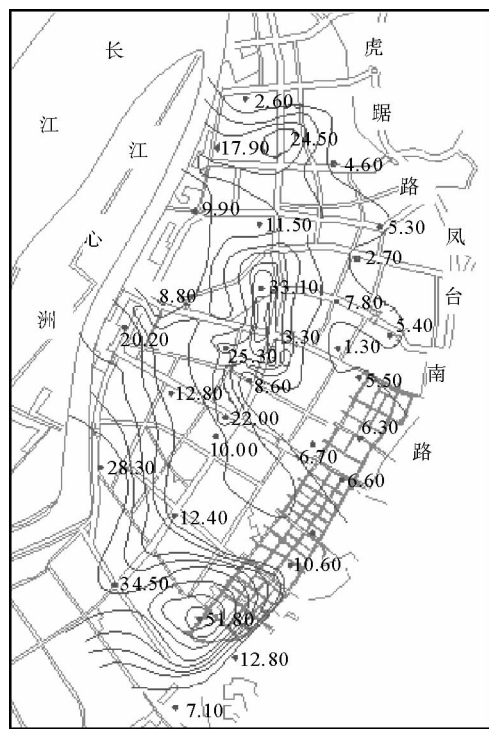


图5 精密水准沉降监测结果图

Fig. 5 The results of subsidence monitoring by precise leveling